UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUÇÃO CIVIL

ANDRESSA GOBBI

CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO ADIÇÃO PARA CONCRETO: INVESTIGAÇÃO SOBRE A ATIVIDADE POZOLÂNICA

CURITIBA
2010

ANDRESSA GOBBI

CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO ADIÇÃO PARA CONCRETO: INVESTIGAÇÃO SOBRE A ATIVIDADE POZOLÂNICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina de Trabalho Final de Curso, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Civil, do Curso de Engenharia Civil, do Departamento de Construção Civil, do Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.
Orientação: Prof. Marcelo H. F. de Medeiros

CURITIBA
2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Eng. Marcelo Henrique Farias de Medeiros, pela dedicação, tempo, incentivo e conhecimentos cedidos para que fosse possível o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq pelo financiamento deste projeto de pesquisa de iniciação científica, que se tornou o meu trabalho final de curso.

Ao LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas, unidade do LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento pelo empréstimo de suas instalações. Em especial ao departamento de ensaios físicos representados por Eustáquio Ferreira e Luiz Fabiano Correa Abdala pelo auxilio na realização dos meus ensaios.

Ao LAMIR – Laboratório de Minerais e Rochas, ao geólogo Rodrigo Secchi, as técnicas em química Elisiane Röper Pescini e Evelin Farias, a estagiária Franciele de Oliveira e ao laboratorista Carlos Lara Ribeiro pelo auxílio na realização dos meus ensaios.

A usina Luso, pelo fornecimento do bagaço de cana-de-açúcar utilizado neste trabalho.

A Tecnosil e a Metacaulim do Brasil pela doação de sílica ativa e metacaulim, respectivamente.

A meus pais, Elisabete Gobbi e Valdemar João Gobbi, por todo o apoio recebido em todas as fases do meu desenvolvimento, responsáveis pelo que sou hoje. E por sempre me incentivarem e apoiarem em qualquer decisão tomada.

A irmã Valéria Gobbi, pela amizade e companheirismo.

A meu namorado Lucas Haerber da Silva, pelo amor, carinho, cuidado e apoio em todos os momentos.

A meus amigos pela amizade, compreensão e pelo apoio ao longo destes anos. Principalmente para André Yukio Borba, Carlos Junior Alves Martins, Daniele Kulisch, Giovana Costa Réus, Luise Caroline Daniel, Monize Siqueira e Pedro Lorenzi pela ajuda indispensável na produção diária de cinza, fato fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, pois sozinha eu jamais teria conseguido.

Em especial a Janine Alicia Groenwold, pela grande amizade formada ao longo desta pesquisa, pelo amor e entusiasmo compartilhado pela nossa cinza, e toda a torcida pela conclusão deste trabalho.

E a todos, professores e colegas que de alguma forma estiveram presentes na realização deste trabalho e ao longo de minha vida acadêmica.

“O livro da natureza está escrito em linguagem matemática de forma que, devemos medir tudo que é mensurável e tornar mensurável tudo que não o é”.

Galileu Galilei

“Saber não é o suficiente, devemos aplicar. Querer não é o suficiente, devemos fazer”.

Johann Wolfgang Von Goethe

RESUMO

Atualmente, com mais de trinta anos de implantação do programa Proálcool no Brasil, este país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com mais de seis milhões de hectares plantados. O surgimento em todo o mundo de veículos bicombustíveis, ou seja, que trabalham com combustíveis derivados do petróleo ou com álcool, proporcionando o incentivo à produção de álcool tem aumentado significativamente.

Este trabalho baseia-se em estudar uma possibilidade de empregar os milhões de quilos de bagaço de cana-de-açúcar, que restam do processo de produção do etanol. Existem indícios de que este material pode ter características pozolânicas, sendo uma opção usá-lo como substituição de parte do cimento na dosagem do concreto, agregando propriedades que resultam em maior durabilidade da estrutura de concreto armado que faça uso deste material.

Esta possibilidade caminha na direção da sustentabilidade em duas vertentes, por um lado, pelo aproveitamento de um resíduo industrial, gerado principalmente na fabricação do etanol, e por outro pela substituição de parte do cimento Portland, que é um material com altíssimo nível de emissão de CO_2 inerente ao seu processo de produção.

Neste trabalho estão apresentados resultados de massa específica, granulometria à laser, fluorescência de raios-X, difração de raios-X e atividade pozolânica com cal de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, metacaulim e sílica ativa, sendo estas duas últimas pozolanas de alta eficiência e consagradas na indústria do concreto. Os resultados indicam a viabilidade técnica para o reaproveitamento e geração de benefícios deste resíduo da indústria agrícola na indústria da construção civil. Porém, o prosseguimento deste trabalho é fundamental para esclarecer e aperfeiçoar o processo de produção da cinza de bagaço de cana-de-açúcar de modo a se atingir alto índice de atividade pozolânica. Os resultados obtidos até o momento não indicam que a cinza tem atividade suficiente para ser classificado como pozolana de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 1992) – IAP com cal. No entanto, é possivel notar nos resultados uma tendência de elevação de atividade pozolânica com a adoção de resfriamento rápido, otimização da temperatura de calcinação e elevação do grau de finura. Desse modo, a investigação dos parâmetros de produção é um ponto fundamental para o sucesso na produção de cinza de bagaço de cana-de-açúcar com propriedades pozolânicas.

Palavras chave: cana-de-açúcar, resíduo, pozolana, adição mineral.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
1.1 Objetivos 14
1.1.1 Objetivo Geral 14
1.1.2 Objetivos Específicos 14
1.2 Estrutura do Trabalho 14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16
2.1 Usina Sucroalcooleira e a Produção de Cana-de-Açúcar 16
2.2 Indústria Cimentícia 19
2.3 Material Pozolânico 20
2.3.1 Efeito fíler e reação pozolânica 22
2.3.2 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar 24
2.3.3 Metacaulim 25
2.3.4 Sílica Ativa 26
3. Programa Experimental 28
3.1 Materiais 28
3.1.1 Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar 28
3.1.2 Metacaulim 33
3.1.3 Sílica ativa 33
3.1.4 Água 34
3.1.5 Cal 34
3.1.6 Agregado miúdo 35
3.2 Métodos 35
3.2.1 Massa específica 35
3.2.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cal 36
3.2.3 Perda ao Fogo 38
3.2.4 Fluorescência de Raios-X (FRX) 38
3.2.5 Difração de Raios-X (DRX) 41
3.2.6 Granulometria a Laser 42
3.2.7 Moagem das Amostras 43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 45
4.1 Massa Específica 45

4.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cal (IAP com Cal) 46
4.3 Fluorescência de Raios-X (FRX) 48
4.4 Difração de Raios-X (DRX) 50
4.5 Granulometria a Laser 52
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 53
5.1 Conclusões 54
5.2 Produção Científica 55
5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros 56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 58
APÊNDICE 1 62
Manual de Instruções – Forno Mufla Q318S24 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo e Comércio Mundial de Cimento (em milhões de toneladas)...20
Tabela 2 - Características físicas e químicas do Metacaulim.....33
Tabela 3 - Características físicas e químicas da Sílica Ativa. 34
Tabela 4 - Boletim de Garantia Hidróxido de Cálcio.....34
Tabela 5 - Massa específica dos materiais em estudo.....45
Tabela 6 - Quantitativo de materiais para IAP com cal. 46
Tabela 7 - Resultado da resistência à compressão.....46
Tabela 8 - Composição Química das Amostras. 48
Tabela 9 - Exigências químicas de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992) e resultados da análise química. 49
Tabela 10 - Produção Bibliográfica relacionadas com a pesquisa. 56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Áreas de concentração das plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade. 17
Figura 2 - Produção de cana-de-açúcar entre 1993 e 2009. 18
Figura 3 - Efeito fíler da sílica ativa. 23
Figura 4 - Redução de vazios com a utilização da sílica ativa. 27
Figura 5 - Localização do Município de Ventania - Pr. 28
Figura 6 - Bagaço de cana-de-açúcar dentro do forno mufla. 29
Figura 7 – Processo de calcinação adotado no forno mufla. 30
Figura 8 - Bagaço de cana-de-açúcar após tratamento prévio 30
Figura 9 - Comparativo entre colorações do material antes e depois da calcinação. 32
Figura 10 - Ensaio de massa específica. 35
Figura 11 - Determinação do índice de consistência normal usando a mesa de espalhamento pela NBR 7215 (ABNT, 1996). 37
Figura 12 - Equipamento para realização de FRX. 39
Figura 13 - Fusora em funcionamento. 40
Figura 14 - Pérola formada na fundição. 40
Figura 15 - Amostra prensada. 41
Figura 16 - Amostras prontas para o ensaio DRX. 42
Figura 17 - Equipamento para realização de DRX 42
Figura 18 - Granulômetro a laser CILAS 1064. 43
Figura 19 – Panelas. 44
Figura 20 - Resistência à compressão IAP com cal. 48
Figura 21 - Difratograma das amostras de 600°C RL e RR. 51
Figura 22 - Difratograma das amostras de 700°C RL e RR. 51
Figura 23 - Difratograma da amostra de metacaulim. 52
Figura 24 - Difratograma da amostra de sílica ativa. 52
Figura 25 - Curva granulométrica das amostras. 53

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Massa específica do material ensaiado. 36
Equação 2 - Quantidade de material pozolânico.....37

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

≈ – aproximadamente

% – porcentagem

°C – graus Celsius

– malha da peneira

γ – massa específica para o ensaio de índice de atividade pozolânica com cal

μm – micrometro

ρ – massa específica

30s – moagem de 30 segundos

60s – moagem de 60 segundos

a/a – relação água/aglomerante

a/c – relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

C – S – H – silicato de cálcio hidratado

CBCA – cinza de bagaço de cana-de-açúcar

CICPG – congresso de iniciação científica e pós-graduação

cm² – centímetro quadrado

cm³ – centímetro cúbico

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CPV ARI RS – cimento Portland V de alta resistência inicial resistente a sulfato

DCC – Departamento de Construção Civil

DRX – difração de raios-X

dm³ – decímetro cúbico

FAPESP – Fundação de amparo à pesquisa de São Paulo

FRX – fluorescência de raios-X

g – grama

h – hora

IAC – Instituto Agronômico de Campinas

IAP – índice de atividade pozolânica

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

kg – quilograma

km – quilômetro

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas

LAMIR – Laboratório de Minerais e Rochas

m^2 – metro quadrado

m^3 – metro cúbico

MCAR – metacaulim de alta reatividade

mm – milímetro

MPa – Mega Pascal

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma MERCOSUL

P.A. – pureza analítica

POLI-USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

QMP – quantidade de material pozolânico

RAA – reação alcali-agregado

RL - resfriamento lento

RR - resfriamento rápido

tf – tonelada-força

ton – tonelada

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UNICA – União da indústria de cana-de-açúcar

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

1. INTRODUÇÃO

O incessante avanço tecnológico, em busca do progresso, consome muita matéria-prima na produção de bens que são utilizados para atender à demanda social do mundo moderno. Os inúmeros processos industriais de fabricação trazem consigo uma vasta gama de resíduos que, muitas vezes, são depositados inadequadamente no meio ambiente. Exemplos disso são as usinas de processamento de cana-de-açúcar para produção de etanol, que geram alguns resíduos industriais como a cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

Este trabalho foi motivado pelo projeto de pesquisa de iniciação científica sobre a cinza de bagaço de cana-de-açúcar como adição para concreto, financiado pelo CNPq e desenvolvido nas instalações do Departamento de Construção Civil da UFPR, onde são estudadas as variáveis que influenciam no grau de pozolanicidade das amostras.

O fato é que nos últimos anos, o Governo Federal tem dedicado parte dos seus recursos para o incentivo ao desenvolvimento e aprimoramento de fontes de combustíveis alternativos. Isso pode ser claramente constatado a partir da quantidade de editais que o CNPq tem disponibilizado para o incentivo às pesquisas nesta área (MEDEIROS, 2008).

Por outro lado, a produção do cimento causa um alto impacto ambiental, que pode ser reduzido com adições pozolânicas em substituição do cimento, tais como: cinza volante, sílica ativa, cinza da casca de arroz, etc. Essa substituição também oferece vantagens econômicas, pois está se substituindo o clínquer (um produto nobre) por resíduos sólidos industriais. Desse modo, pode-se dizer que um dos avanços mais importantes do desenvolvimento do concreto neste último século foi a utilização de subprodutos industriais na sua produção.

Neste contexto, este trabalho caminha na direção da sustentabilidade em duas vertentes. Por um lado, pelo aproveitamento de um resíduo industrial, gerado principalmente na fabricação do etanol, e por outro pela substituição de parte do cimento Portland, que é um material com altíssimo nível de emissão de CO_2 inerente ao seu processo de produção (MEDEIROS, 2008).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a influencia de variáveis de produção da cinza de bagaço de cana-de-açúcar na sua atividade pozolânica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar a influência da temperatura de calcinação do bagaço de cana-de-açúcar na eficiência pozolânica da cinza;
- Estudar a influência da temperatura de resfriamento da cinza de bagaço de cana-de-açúcar na sua eficiência pozolânica;
- Estudar a influência da moagem da cinza de bagaço de cana-de-açúcar no grau de pozolanicidade;
- Determinar o potencial pozolânico da cinza de bagaço de cana-de-açúcar comparando com outras duas pozolanas comercialmente conhecidas: metacaulim e sílica ativa.

1.2 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, com conteúdos indispensáveis ao entendimento do tema e o desenvolvimento de uma metodologia, bem como a discussão dos resultados obtidos com esta pesquisa. Na Introdução destacam-se a importância do tema e os objetivos do estudo. Os demais capítulos estão organizados de forma a promover um maior conhecimento da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), como mostrado a seguir:

Capítulo 2: revisão bibliográfica;

Capítulo 3: trata do programa experimental propriamente dito. Este capítulo envolve desde a coleta da matéria-prima (bagaço de cana-de-açúcar), sua transformação em cinza e então a caracterização física, química e mineralógica. A metodologia é descrita por meio dos procedimentos de ensaio;

Capítulo 4: destinado à apresentação e análises dos resultados obtidos com a pesquisa;

Capítulo 5: refere-se às conclusões, publicações geradas pelo estudo e sugestões para trabalhos futuros;

As referências bibliográficas utilizadas se encontram no final deste trabalho assim como o apêndice.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são apresentadas informações sobre a indústria sucroalcooleira e cimentícia, a produção de cana-de-açúcar no Brasil, os materiais pozolânicos e seus efeitos, tanto físico quanto químico, e os três materiais utilizados neste trabalho: cinza de bagaço de cana-de-açúcar, metacaulim e sílica ativa.

2.1 Usina Sucroalcooleira e a Produção de Cana-de-Açúcar

No início do séc. XXI, com a certeza da escassez do petróleo, o aumento dos preços e o impacto ambiental originado por combustíveis derivados dele, novas fontes de energia têm sido pesquisadas (DE PAULA, 2006).

Essa busca atraiu novos investimentos para a formação de novas áreas de cultivo da cana-de-açúcar no Brasil. Isso começou mais ativamente quando, em 1975, o governo do país criou o Proálcool e assumiu o desafio de produzir um combustível alternativo ao petróleo. De acordo com Aranda (2009), a produção do álcool oriundo da cana-de-açúcar, da mandioca ou de qualquer outro insumo deveria ser incentivada por meio da expansão da oferta de matérias-primas, com especial ênfase no aumento da produção agrícola, da modernização e ampliação das destilarias existentes e da instalação de novas unidades produtoras, anexas a usinas ou autônomas, e de unidades armazenadoras. Após isso, a área de canaviais foi multiplicada por quatro.

Hoje, após mais de trinta anos de implantação do programa Proálcool, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (UNICA, 2006), com mais de seis milhões de hectares plantados.

Com o surgimento em todo o mundo de veículos bicombustíveis, ou seja, que trabalham com combustíveis derivados do petróleo ou com álcool que tem a eficácia semelhante aos que usam apenas combustíveis do petróleo, o incentivo à produção de álcool tem aumentado significativamente nos últimos anos. Um estudo da UNICA (União da Indústria de cana-de-açúcar) aponta que o setor terá que atender até o final de 2010 uma demanda adicional de 10 bilhões de litros de álcool, além de 7 milhões de toneladas de açúcar.

Na safra do ano de 2009, de acordo com o IBGE, a lavoura da cana cobriu 8,6 milhões de hectares e a produção atingiu 687 milhões de toneladas, um volume sete vezes maior que o de 1975. O aumento do rendimento mostra a evolução da tecnologia aplicada nas áreas de produção da cana. A grande evolução da produtividade foi alcançada apesar da expansão da cana para áreas de solos mais pobres. O plantio da cana inicialmente era feito em São Paulo, em terras muito férteis, afirma Marcos Landell, diretor do programa Cana do IAC – Instituto Agronômico do Estado de São Paulo. Hoje, a expansão se dá na região da zona da mata no nordeste brasileiro, distribuída nos estados da Paraíba, Pernambuco e de Alagoas, e das regiões de Piracicaba e de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo (PORTAL DO BIODIESEL, 2007). Os maiores produtores de cana-de-açúcar hoje são: Alagoas, Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Paraná (todos com produção maior do que 20 milhões de toneladas, safra de 07/08). A Figura 1 ilustra no mapa do Brasil as áreas onde se encontram o plantio da cana-de-açúcar. Além disso, a Figura 2 apresenta a evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil entre 1993 e 2009, de acordo com os dados disponibilizados pela União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA).

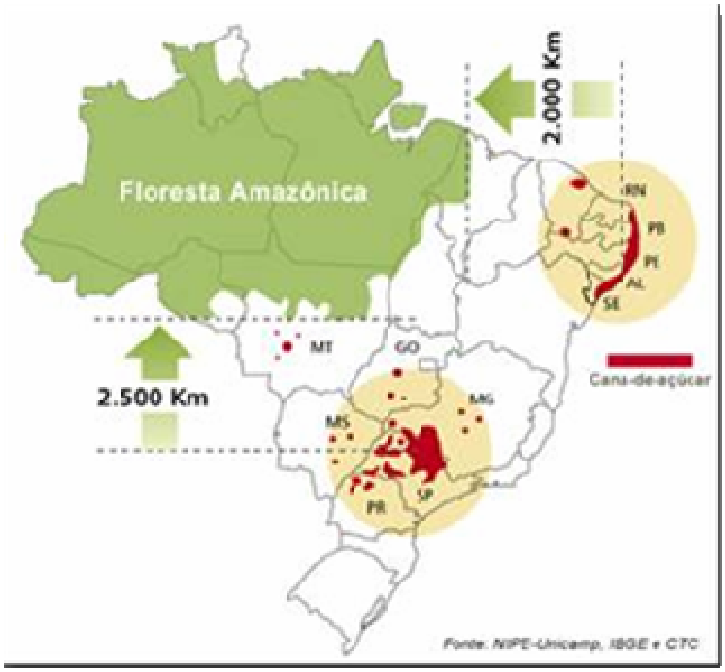


Figura 1 - Áreas de concentração das plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade.

Fonte: IBGE.

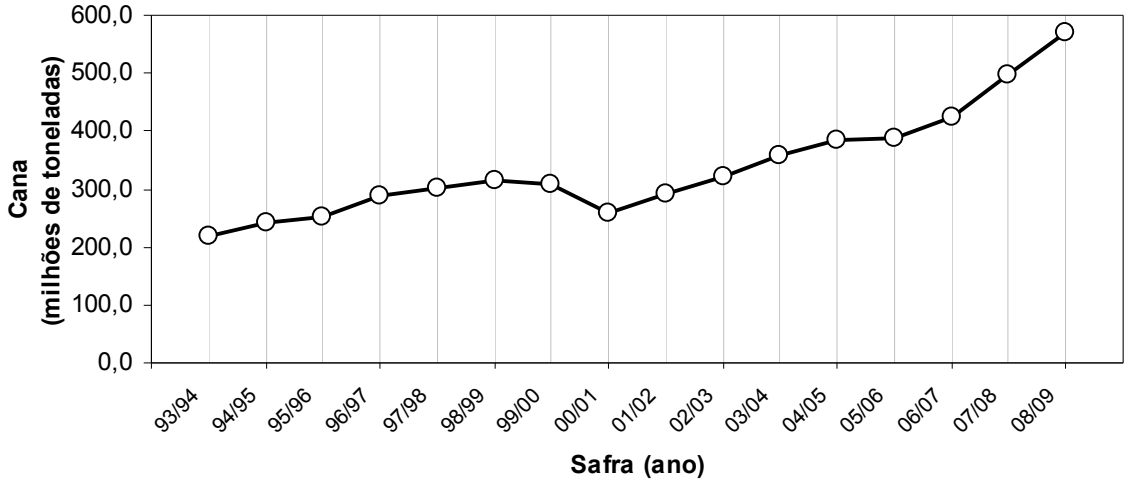


Figura 2 - Produção de cana-de-açúcar entre 1993 e 2009.

Fonte: UNICA, 2009.

Após o processamento da cana para extração do caldo, através de várias etapas de moagem, é produzido um resíduo que é o bagaço. De acordo com Romero (2007), para cada tonelada de cana é gerado cerca de 0,25 tonelada de bagaço. De acordo com a Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (FAPESP) estima-se que, a cada ano, sobrem de 5 a 12 milhões de toneladas deste material, que corresponde a aproximadamente 30% da cana moída. As próprias usinas utilizam 60% a 90% desse material como fonte energética, em substituição ao óleo combustível no processo de aquecimento das caldeiras e para a geração de energia elétrica (CAMARGO *et al*., 2007). Primeiramente é feita a queima do bagaço, e com o calor produzido, gera-se vapor d'água que passa por uma turbina ligada a um gerador. Existem usos não energéticos para esses excedentes, alguns comercialmente viáveis, como, por exemplo, o emprego do material como matéria prima na fabricação de papel e papelão, entre outros. Mesmo assim muito do bagaço excedente não é utilizado, e acaba gerando problemas ambientais e de estocagem.

Da co-geração de energia nas usinas, o resíduo produzido é a cinza do bagaço de cana. Para cada 250 kg de bagaço de cana queimado nas caldeiras, produz-se aproximadamente 6 quilos (2,4 %) de cinza (FAPESP, 2007). Em 2002, o Brasil produziu cerca de 1,6 milhões de toneladas de cinza do bagaço de cana. Esse resíduo é utilizado nas usinas como fertilizante nas lavouras de cana. Atualmente

possuem trabalhos (LUNA e COUTINHO, 2008) que justificam o uso do bagaço de cana-de-açúcar como adubo, porém não para a cinza gerada.

Na safra de 08/09 o estado do Paraná produziu aproximadamente 45 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e 2 milhões de litros de etanol (anidro e hidratado) (UNICA, 2009). Baseando-se nas proporções adotadas por Romero (2007), anteriormente citadas, e considerando que toda produção do Paraná (safra 08/09: 45 milhões de toneladas) seja utilizada para a produção de álcool, se um quarto dessa produção se transformar em bagaço (aproximadamente 11 milhões de toneladas) e for queimada nas usinas, então o Paraná produziu, na safra 08/09, 270 toneladas de cinza de bagaço de cana. Caso fosse provada a viabilidade técnica deste tipo de cinza como adição no teor de substituição de 10% do cimento, isso resultaria na produção de 54.000 sacos de cimento com menor grau de impacto ambiental. Considerando um consumo de cimento médio de 350 kg/m^3, isso significa cerca de 7.714 m^3 de concreto produzido (GOBBI *et al*., 2010).

Como ainda não se aplicam técnicas de reciclagem para a cinza produzida na co-geração de energia, esta grande quantidade de resíduo acaba sendo despejado em aterros sanitários, onde seu despejo além de ocupar grandes territórios, se for feito de maneira incorreta pode causar impactos ambientais, podendo acarretar em danos a natureza e a população local (GROENWOLD, 2010).

A adição deste material com provável atividade pozolânica pode acarretar numa melhoria nas propriedades do concreto produzido e poderá reduzir o consumo do clínquer por m^3 de concreto, resultando assim em menor emissão de CO_2 para a atmosfera e menor consumo de bens naturais para a produção deste material. Este é o foco deste trabalho, investigar a possibilidade de desenvolver uma forma de produção da cinza de bagaço de cana-de-açúcar que permita empregá-la como adição pozolânica para concreto.

2.2 Indústria Cimentícia

Observando a Tabela 1, em apenas 6 (seis) anos, de 2000 a 2006, a produção de cimento aumentou aproximadamente em 900 milhões de toneladas.

Tabela 1 - Consumo e Comércio Mundial de Cimento (em milhões de toneladas).

Ano	Produção	Consumo	Exportação	Importação
2000	1.653	1.645	129	129
2001	1.698	1.694	133	132
2002	1.815	1.813	129	129
2003	1.964	1.961	137	136
2004	2.135	2.139	148	146
2005	2.276	2.296	172	172
2006	2.542	2.540	174	174
Fontes	SNIC	CEMBUREAU	OFICIMEN	CIMENTO.ORG

Com a elevação da produção de cimento, aumentaram-se significativamente também os impactos ambientais causados pelas usinas cimentícias. Estima-se que para cada tonelada de cimento produzida é emitido na atmosfera aproximadamente uma tonelada de gás carbônico (principal gás contribuinte para o aumento do efeito estufa) divididas em: descarbonatação (50%), combustão no forno de clínquer (40%), transporte de matérias-primas (5%) e eletricidade (5%) (CARVALHO, 2008).

Medidas já estão sendo tomadas por parte das indústrias para a redução destes impactos ambientais, mas estes ainda correspondem à 7% das emissões de gás carbônico mundiais (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Como exemplo a Votorantim Cimentos, que com o desenvolvimento e implantação de tecnologias limpas, reduziu suas emissões em 13,6% se comparado com as emissões de 1990. Isto foi alcançado com o aumento do teor de adições minerais no cimento (escória, cinzas volantes, entre outros). Atualmente, esta empresa emite 627 quilos de CO_2 para cada tonelada de cimento produzido, enquanto a média mundial é de quase 1.000 kg/ton (LIMA, 2010).

2.3 Material Pozolânico

Materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, quando finamente divididos e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de

cálcio, à temperatura ambiente para formar composto com propriedades cimentantes (NBR12653/92).

A avaliação da pozolanicidade pode ser realizada de acordo com ensaios prescritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas e alguns procedimentos, indicados abaixo:

- NBR 5751 (ABNT, 1992) – Índice de Atividade Pozolânica com Cal: (sendo este o mais utilizado, devido ao menor período para obtenção do resultado e a facilidade na sua execução), o ensaio consiste na elaboração de uma pasta composta por hidróxido de cálcio, a pozolana em estudo, areia e água (o ensaio será descrito mais adiante);
- NBR 5752 (ABNT, 1992) – Índice de Atividade Pozolânica com Cimento: o ensaio consiste na comparação entre uma argamassa de referência (cimento, areia e água) e uma argamassa com a adição da pozolana em análise;
- Chapelle modificado: uma determinada quantidade de material supostamente pozolânico e de CaO são colocados para reagir na presença de água fervente (100°C), em torno de 16 horas, o resultado é expresso pela quantidade de óxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material pozolânico, e quanto maior o consumo de CaO, mais pozolânico é o material (FREITAS, 2005).

A utilização de material pozolânico se dá de duas formas, como adição ao cimento Portland durante sua fabricação, gerando os cimentos compostos (forma mais usual em países como Brasil, França e Alemanha), ou como adição ao concreto (como é o caso nos Estados Unidos). Independente da forma, o resultado é semelhante e muitos efeitos exercidos são benéficos. Entre as propriedades influenciadas pela presença de adições pozolânicas estão o calor de hidratação, a resistência mecânica, a fluidez e o aumento da durabilidade, a questão mais relevante da sua utilização (ISAIA *et al.*, 2010).

A reação pozolânica ocorre de forma lenta, desta forma a liberação de calor também acompanha esta velocidade. O uso de adições minerais oferece a possibilidade de reduzir o aumento da temperatura quase que em proporção direta à quantidade de cimento Portland substituído pela adição, sendo considerado o calor de hidratação total produzido pelas reações pozolânicas como a metade do calor médio produzido pela hidratação do cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

As adições minerais estão diretamente ligadas à produção de concreto de alta resistência e alto desempenho desde a década de 80, devido ao efeito químico relacionado com a adição envolver a formação adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto responsável pela maior fração de resistência das pastas de cimento. O outro efeito importante é a transformação de grandes vazios através da ocupação deste espaço gerando uma grande quantidade de poros menores. A redução de tamanho e volume de vazios reduz a permeabilidade, sendo este o ponto principal referente à durabilidade (GROENWOLD, 2010).

As adições minerais podem ser classificadas em 3 (três) categorias, materiais cimentícios (como a escória de alto-forno), materiais pozolânicos (como a sílica ativa e a cinza volante) e materiais não reativos (fíler calcário) (ISAIA *et al.*, 2010).

Alguns estados, como o Paraná, têm carência de pozolana disponível, sendo necessária a suspensão de produção do cimento com adições pozolânicas em determinados momentos devido à falta de cinza volante para adição no cimento. Por outro lado, existem algumas pesquisas no sentido de viabilizar o uso de alguns resíduos agrícolas para a produção de pozolanas. Uma delas é a cinza de casca de arroz muito desenvolvida no sul do país devido à concentração de plantio deste grão no Rio Grande do Sul. Outro exemplo, apesar de muito menos consagrado do que o anterior, é a cinza de folha de bananeira, atualmente em estudo na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR (GROENWOLD, 2010).

2.3.1 Efeito fíler e reação pozolânica

As adições possuem duas formas básicas de atuação no concreto: o efeito fíler[1] e a reação pozolânica. O primeiro deles é um efeito físico, que ocorre em pozolanas muito finas, tais como as de alta eficiência como o metacaulim e a sílica ativa, por possuírem partículas muito menores que as do cimento, elas preenchem

[1] O fíler é um material constituído por fragmentos de rochas de tamanhos máximos inferiores a 0,075 mm, usados para preencher falhas na curva granulométrica, como o pó de quartzo, pó de pedra, material carbonático, entre outros. Quando utilizados no concreto, aumentam a resistência mecânica, devido ao aumento na compacidade proveniente do chamado efeito fíler.

vazios existentes entre estas partículas de cimento Portland contribuindo para o melhor empacotamento dos grãos de concretos e argamassas (Figura 3).

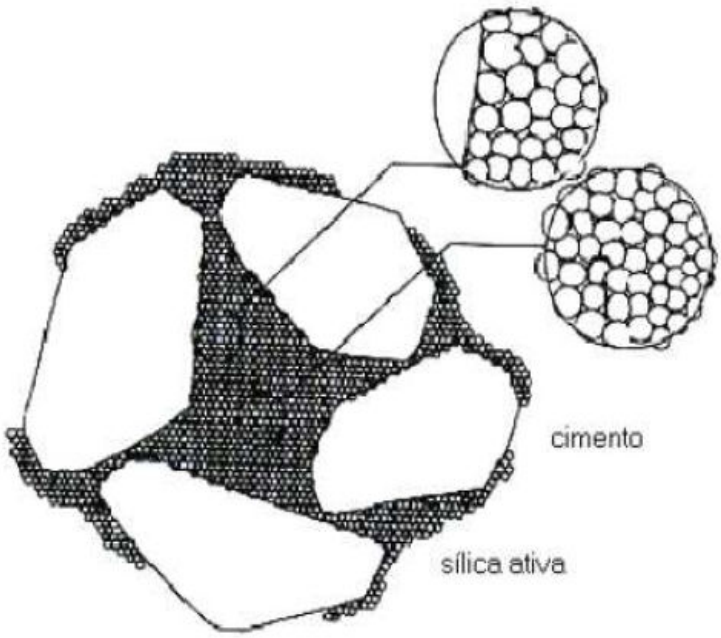


Figura 3 - Efeito fíler da sílica ativa.

Fonte: Aïtcin, 2000.

Contudo, os grãos muito finos provocam o aumento no consumo de água para uma mesma trabalhabilidade, ou seja, uma relação água/cimento mais alta, principalmente para altos teores de substituição. E quanto mais alta a relação a/c, menor é a resistência e a durabilidade do concreto. Segundo Malhotra e Mehta (1996), este aumento no consumo de água pode não ocorrer em concretos com consumo de cimento menor do que 300 kg/m³. Já para concreto com elevado consumo de cimento, é possível a utilização de aditivos superplastificantes para evitar o aumento da relação a/c.

Já o segundo é um efeito químico, que todo o material pozolânico tem que apresentar. Quando estes materiais são pulverizados passam a apresentar propriedades de ligantes hidráulicos, mas não é de água apenas que eles necessitam. Para que ocorra a reação pozolânica é necessária a presença de hidróxido de cálcio (cal hidratada) ou materiais que possam liberar portlandita (como é o caso do clínquer) para reagir com a sílica amorfa e formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H responsável pela resistência da pasta).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a importância técnica do uso dos cimentos pozolânicos provém de três aspectos principais da reação pozolânica: a reação é lenta, desta forma a liberação de calor e o desenvolvimento da resistência também são lentos. Em segundo lugar, há o consumo de hidróxido de cálcio ao invés da sua produção, este contribui muito pouco para a resistência mecânica da pasta de cimento hidratada e pode ser responsável por problemas de durabilidade, uma vez que pode ser lixiviado facilmente pela água. Terceiro, os produtos das reações são muito eficientes em preencher os espaços capilares, melhorando o desempenho (resistência e impermeabilidade) do produto final.

As pozolanas naturais dispensam qualquer tratamento para apresentar ou potencializar sua pozolanicidade, exceto a moagem, procedimento que aumenta a área de contato para as reações. Já no caso das pozolanas artificiais, aquelas que necessitam de beneficiamento, estes tratamentos, quando térmicos a elevadas temperaturas influenciam na cristalização do material, transformando fases amorfas em cristalinas. A sílica amorfa presente nos materiais pozolânicos possui fases polimórficas[2] como o quartzo, tridimita e cristobalita. Sendo os materiais com estrutura desordenada (amorfa) os que apresentam maior reatividade comparada aos de estrutura cristalina (CORDEIRO, 2006).

O efeito fíler e a reação pozolânica são ações responsáveis pela diminuição do volume de vazios, pelo fortalecimento da microestrutura e pela redução da porosidade e refinamento dos poros.

2.3.2 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Se esta cinza é um material pozolânico ou não, é um tema controverso. Alguns pesquisadores como Sales *et al.* (2010), chegaram a conclusão que este tipo de material deve ser usado como material inerte, ou seja, agregado miúdo na dosagem de concretos e argamassas. Já outros pesquisadores Freitas (2005) e Cordeiro (2009) atestam a atividade pozolânica das cinzas usadas em seus estudos. Este fato leva a crer que o material é pozolânico em alguns casos e em outros não e

[2] Fase sólida com mesma composição química, porém estrutura cristalina diferenciada.

isso deve ter relação com a forma de produção da cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

A cinza de bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) é obtida a partir da queima do bagaço nas fornalhas das caldeiras das usinas produtoras de açúcar e álcool. A produção da cinza inicia-se com o plantio da cana e posteriormente a queima da lavoura para auxiliar na colheita. Neste processo é gerada a cinza da palha que não é o material em questão neste trabalho. Em seguida, aplica-se a moagem da cana, resultando no bagaço úmido, este é queimado nas fornalhas para a co-geração de energia, gerando como produto final a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (FREITAS, 2005).

2.3.3 Metacaulim

Metacaulim é uma adição mineral aluminosilicosa que provém da calcinação de argilas extremamente finas, compostas com caulinita a temperaturas entre 600°C e 900ºC. Sua composição química é predominantemente sílica (≈50%) e alumina (≈40%). Possui uma coloração variável, dependendo do teor de óxido de ferro presente na matéria prima. Ao contrário da maioria de outras adições minerais, o metacaulim não é um rejeito industrial e possui controle de produção específico (FONSECA, 2010).

Uma das vantagens da utilização do metacaulim é referente à questão ambiental, pois um dos resíduos gerados pela produção desta adição é o vapor de água, o qual é lançado diretamente na atmosfera sem qualquer dano ao meio ambiente. Portanto, como a utilização de metacaulim no concreto faz com que o consumo de cimento seja menor, há uma menor emissão de gás carbônico na atmosfera (NITA, 2006).

No Brasil, sua produção em escala comercial começou no ano 2000. Seu principal uso é para prevenir reações álcali-agregado e melhorar a durabilidade do concreto em ambientes agressivos. Sua massa específica está em torno de 2,60 kg/dm³. De acordo com a Metacaulim do Brasil, a dosagem recomendada para a utilização de metacaulim é de 4% a 12%. O tamanho médio das partículas é de 1,5 μm e a superfície específica está em torno de 16.800 m²/kg (RILEM, 1998). A forma

dos grãos é prismática e sua textura é áspera, o tamanho das partículas é variável em função da moagem.

Segundo Malhotra e Mehta (1996), tem-se também obtido esta pozolana através da calcinação em baixas temperaturas e da moagem de argilas especiais como o caulim muito puro. Neste processo, é obtida uma pozolana com alta atividade pozolânica, fazendo com que recebesse a denominação de metacaulim de alta reatividade (MCAR).

Helene e Medeiros (2004) realizaram na POLI-USP um extenso estudo que demonstrou a eficiência do metacaulim quanto à mitigação da RAA, resistência à penetração de cloretos, redução da absorção e permeabilidade a água, elevação da resistividade elétrica, entre outros fatores. Este estudo foi muito importante para a consagração desta adição no mercado nacional.

2.3.4 Sílica Ativa

Também conhecida como microssílica ou fumo de sílica, é um material decorrente do processo de produção de silício metálico ou liga de ferro silício em fornos elétricos. Durante o processo, é gerado o gás SiO que, ao sair do forno, oxida-se formando partículas de SiO_2 (dióxido de silício composto químico também conhecido como sílica), sendo então captadas por sistemas de filtros coletores. Constitui um tipo de pozolana formada essencialmente por partículas esféricas com diâmetros menores que 10^{-6} m de sílica no estado amorfo (ABNT NBR 13956/1997).

Atualmente, tem sido empregada principalmente em concretos de alta resistência. Sua massa específica é em torno de 2,20 kg/dm³. De acordo com Carmo (2006), o teor de SiO_2 é maior que 85%, o diâmetro médio das partículas é entre 0,10 e 0,20 μm, a superfície específica é cerca de 20.000 m²/kg.

A utilização da sílica ativa proporciona ao concreto no estado endurecido a redução dos vazios, pois esta reage com o hidróxido de cálcio (um cristal fraco e solúvel em água que representa 15 a 25% do volume da pasta) transformando-o em C-S-H, um material resistente e insolúvel (Figura 4).

Figura 4 - Redução de vazios com a utilização da sílica ativa.
Fonte: Tecnosil.

A quantidade de sílica ativa adicionada é um parâmetro importante que influencia a resistência à compressão dos concretos. Para construções convencionais, o fabricante (Tecnosil) indica teores ótimos variando de 5% a 10%.

3. Programa Experimental

O capítulo intitulado como programa experimental apresenta os questionamentos iniciais, a produção da cinza de bagaço de cana-de-açúcar, através da calcinação do bagaço em laboratório, os materiais utilizados para a execução dos ensaios, além dos métodos prescritos em norma e procedimentos laboratoriais para a realização da massa específica, índice de atividade pozolânica com cal, perda ao fogo, fluorescência de raios-X, difração de raios-X, granulometria a laser e moagem das amostras.

3.1 Materiais

3.1.1 Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar

O bagaço de cana de açúcar utilizado para a produção da cinza deste estudo é proveniente da Usina Luso (nome fantasia), localizada na Rodovia Transbrasiliana, km 151, no Município de Ventania no estado do Paraná (Figura 5).

Figura 5 - Localização do Município de Ventania - Pr.

Fonte: ParanáMesoMicroMunicip.svg.

Preliminarmente, um estudo sobre o equipamento utilizado para a calcinação teve que ser efetuado. O equipamento utilizado nesta pesquisa permite inúmeras programações com diferentes combinações de tempos de queima e de temperaturas. Um manual com instruções simplificadas foi elaborado para facilitar a programação do equipamento para outros operadores (Apêndice 01).

O primeiro experimento realizado encontrou dificuldades durante a sua execução, pois previa a transformação do bagaço de cana-de-açúcar em cinza diretamente no forno mufla (Figura 6Figura 6 - Bagaço de cana-de-açúcar dentro do forno mufla.), padronizando as amostras e evitando as possíveis variáveis como a alteração de temperatura entre fornalhas, ou mesmo a dificuldade de manter um patamar de estabilização de temperatura gerando queimas não uniformes devido à rusticidade dos mesmos.

Figura 6 - Bagaço de cana-de-açúcar dentro do forno mufla.
Fonte: Própria.

Esta experiência inicial tinha como programação escolhida para a calcinação, o elemento de partida a temperatura ambiente, sendo esse o primeiro ponto, elevando-se gradativamente a temperatura no período de 1 hora, devendo chegar após esse período nas temperaturas escolhidas (600°C e 700°C) baseado nos melhores resultados obtido nas pesquisas de Freitas (2005), e o melhor tempo de duração do patamar de estabilização com duração de 5 horas. Após as 5 horas na temperatura escolhida, o forno resfriava lentamente até se estabilizar a temperatura ambiente, conforme se pode visualizar mais claramente na Figura 7.

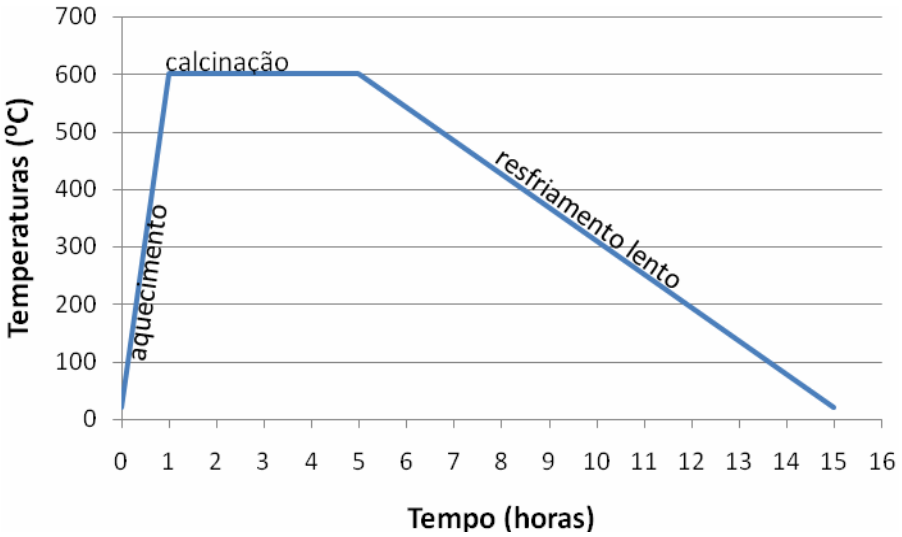


Figura 7 – Processo de calcinação adotado no forno mufla.

Fonte: Própria.

Porém esta tentativa não obteve sucesso, pois o material entrava em processo de combustão quando submetido a altas temperaturas, necessitando de um tratamento prévio, ou seja, uma queima anterior ao procedimento de calcinação. Esta etapa de queima antes da calcinação foi introduzida para evitar danos ao forno mufla do Laboratório de Durabilidade do Concreto do Departamento de Construção Civil (DCC) e era realizada ao ar livre em recipientes metálicos. Após o tratamento prévio, sem ainda o processo de calcinação no forno mufla, as amostras foram denominadas *in natura* (sendo esta a primeira amostra) e apresentavam uma coloração preta (Figura 8).

Figura 8 - Bagaço de cana-de-açúcar após tratamento prévio.

Fonte: Própria.

Solucionada a primeira dificuldade encontrada, iniciou-se a produção da cinza, porém ainda com dúvidas não esclarecidas sobre algumas variáveis na produção e sua influência na pozolanicidade do material:

Dúvida 1 – Inserção do material no forno mufla: O material *in natura* deve ser inserido com o forno mufla em temperatura ambiente, elevando-se gradativamente até a temperatura de calcinação conforme programação do forno, ou inserido diretamente em altas temperaturas? Partindo do princípio que na prática as fornalhas não devem possuir tempo ocioso no seu resfriamento[3], optou-se por inserir o material *in natura* diretamente em altas temperaturas, aquecendo antecipadamente o forno até a temperatura em questão (600°C ou 700°C).

Dúvida 2 – Resfriamento da cinza: A cinza de bagaço de cana-de-açúcar produzida após a calcinação seria resfriada lentamente, ou seja, permaneceria dentro do forno mufla para que gradativamente a temperatura baixasse de 600°C ou 700°C até a temperatura ambiente[4] (entorno de 23°C) ou deveria sofrer um choque térmico, levando menos tempo para a redução da temperatura[5]? Ambas as condições foram empregadas nesta pesquisa: o primeiro caso foi designado resfriamento lento (RL) e o segundo processo foi denominado resfriamento rápido (RR). Os questionamentos apresentados anteriormente e a pesquisa realizada levaram a decisão da produção das seguintes amostras:

- *In natura*: bagaço de cana-de-açúcar com tratamento prévio (bagaço queimado com fogo ao ambiente natural);
- 600°C RL: material *in natura* calcinado por 5 horas a temperatura de 600°C e deixado resfriar lentamente dentro do forno mufla;
- 600°C RR: material *in natura* calcinado por 5 horas a temperatura de 600°C e deixado resfriar rapidamente;

[3] O tempo ocioso no resfriamento se refere a resfriar gradativamente o material dentro do forno com o seu desligamento. Desse modo, considerou-se que o processo de queima deva tirar a cinza e colocar mais material sem o desligamento do forno, dando mais velocidade ao processo.

[4] Esta estabilização com a temperatura ambiente leva em torno de 15 horas, resultando em um resfriamento bastante lento.

[5] Após o término das cinco horas de calcinação a amostra seria retirada de elevadas temperaturas e entraria em contato diretamente com ambiente (23°C aproximadamente e umidade relativa de zero, pois a amostra era condicionada dentro de um dessecador com sílica gel) que ocasionaria um resfriamento rápido da cinza.

- 700°C RL: material *in natura* calcinado por 5 horas a temperatura de 700°C e deixado resfriar lentamente dentro do forno mufla;
- 700°C RR: material *in natura* calcinado por 5 horas a temperatura de 700°C e deixado resfriar rapidamente.

Após os primeiros ensaios, mais uma variável foi incluída na pesquisa, a moagem das amostras afim do aumento da área de contato (superfície específica), e a comprovação do aumento da reatividade com uma maior área reativa. Desta forma mais uma amostra foi obtida.

- 600°C RR + 30 s: bagaço de cana-de-açúcar com tratamento prévio calcinado por 5 horas, deixado resfriar rapidamente e com moagem de 30 segundos em moinho de panelas;
- Além das amostras de metacaulim e sílica ativa.

Realizando-se pesagens da amostra *in natura*, e após a sua calcinação, a matéria prima utilizada nesta pesquisa apresentou aproximadamente uma redução de 2,1% em massa. Como mostra a Figura 9, a cinza possuía cor preta antes de ser calcinada e após passar pelo processo de calcinação apresentava coloração marrom claro/bege.

Figura 9 - Comparativo entre colorações do material antes e depois da calcinação.
Fonte: Própria.

Uma grande dificuldade encontrada no processo de calcinação foi a produção diária de cinza, que era de aproximadamente 12 gramas, o que acabou limitando a quantidade de ensaios a serem realizados, implicando em poucas variações de tempo e temperatura incluídas no estudo. Outro obstáculo enfrentado

durante esse período foi a quebra freqüente dos cadinhos de porcelana utilizados no processo de calcinação do material. Esses recipientes trincavam com o choque térmico, e após alguns ciclos já não era mais possível a utilização dos mesmos[6].

3.1.2 Metacaulim

O metacaulim utilizado para a realização desta pesquisa é fabricado pela Metacaulim do Brasil. De acordo com o fabricante, sua finura # 325 (via úmida) é menor do que 1,0% e a área específica maior do que 300.000 cm²/g. Para se ter uma idéia de comparação o cimento CPV ARI RS tem área específica a ordem de 4.476 cm^2/g, ou seja, o metacaulim utilizado tem finura muito maior do que este tipo de cimento que é o cimento mais fino do mercado brasileiro. Outras características do material podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características físicas e químicas do Metacaulim.

Características Físicas e Químicas	
Teor de SiO_2	51%
Teor de Al_2O_3	41%
Área específica	> 300.000 cm^2/g
Formato da partícula	prismático
Massa específica	< 260 kg/m^3

Fonte: Própria.

3.1.3 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada é fabricada pela Tecnosil e foi doada pela empresa para a realização desta pesquisa. De acordo com o fabricante, suas características físicas e químicas são descritas na Tabela 3.

[6] Isso foi relativamente sanado posteriormente quando se obteve com técnicos do LAMIR uma referência de cadinhos de melhor qualidade e de maior resistência ao choque térmico.

Tabela 3 - Características físicas e químicas da Sílica Ativa.

Características Físicas e Químicas	
Teor de SiO_2	> 90%
Área específica	190.000 cm^2/g
Formato da partícula	Esférico
Massa unitária não densificada	< 350 kg/m^3
Massa unitária densificada	> 350 kg/m^3

Fonte: Própria.

3.1.4 Água

A água empregada na confecção das argamassas para o ensaio prescrito pela NBR 5751 (ABNT, 1992) foi água destilada.

3.1.5 Cal

O hidróxido de cálcio P.A. utilizado foi do fabricante Vetec Química Fina e os dados do boletim de garantia constam na Tabela 4.

Tabela 4 - Boletim de Garantia Hidróxido de Cálcio.

Teor $Ca(OH)_2$	≥ 95%
Teor ($CaCO_3$)	≤ 3%
Insolúvel em HCl	≤ 0,1%
Cloreto (Cl)	≤ 0,03%
Compostos Sulfurados (como SO_4)	≤ 0,1%
Metais Pesados (como Pb)	≤ 0,003%
Ferro (Fe)	≤ 0,05%
Magnésio e Sais Básicos (como Sulfatos)	≤ 1,0%

Fonte: Própria.

3.1.6 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado em todos os ensaios de atividade pozolânica com cal, onde era necessária a aplicação do mesmo, foi a areia normal, de acordo com as prescrições da NBR 7214 (ABNT, 1982).

3.2 Métodos

3.2.1 Massa específica

O ensaio foi realizado com um frasco volumétrico de Le Chatelier (Figura 10), de vidro de borossilicato com capacidade de 250 cm³ até a marca zero da escala. O recipiente tem graduação que permite leituras de 0,05 cm³.

Figura 10 - Ensaio de massa específica.
Fonte: Própria.

De acordo com a norma NBR NM 23 (ABNT, 2001), o frasco deve ser preenchido com o líquido até a marca entre zero e 1 cm³, em seguida o frasco vai para o banho termorregulador, onde deve permanecer submerso em água por 30

minutos (a temperatura do banho não pode variar mais que 0,5°C durante o ensaio). Após esse tempo é registrada a primeira leitura (V1).

Em seguida, foi introduzida uma massa do material suficiente para provocar um deslocamento do líquido utilizado até a marca acima de 18 cm³. Após a inserção do material no frasco, realizou-se movimentos giratórios com o frasco para retirar as bolhas de ar e deixou-se em banho termorregulador novamente. Após 30 minutos, realizou-se nova leitura (V2)

O resultado foi obtido através da Equação 1, sendo representado pela média de duas determinações que não diferiram mais do que 0,01 g/cm³ entre si.

$$\rho = m.(V2 - V1)$$

Equação 1 – Massa específica do material ensaiado.

Onde:

ρ: massa específica do material ensaiado (g/cm³);

m: massa do material que foi introduzida no frasco (g);

V1: primeira leitura realizada (cm³);

V2: Segunda leitura realizada (cm³).

3.2.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cal

Conforme prescrito na NBR 5751/92, foram moldados três corpos-de-prova com as quantidades de materiais indicadas a seguir:

O ensaio foi realizado em argamassa confeccionada com a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, areia padrão (234 g de cada fração 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm), 104 g de hidróxido de cálcio e a água necessária para se obter a consistência da argamassa em 225 ± 5 mm, conforme as prescrições do Anexo B da NBR 7215 (ABNT, 1996) pelo ensaio da mesa de espalhamento (Figura 11).

Figura 11 - Determinação do índice de consistência normal usando a mesa de espalhamento pela NBR 7215 (ABNT, 1996).
Fonte: Própria.

O material pozolânico foi ajustado de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**:

$$QMP = \frac{2 \cdot \gamma_{poz} \cdot 104g}{\gamma_{cal}}$$

Equação 2 - Quantidade de material pozolânico.

Onde:
QMP: quantidade de material pozolânico para a realização do ensaio;
$\gamma_{pozolana}$: massa específica da pozolana a ser estudada;
γ_{cal}: massa específica do hidróxido de cálcio.

Após a moldagem, os corpos de prova foram curados nos próprios moldes durante 24 ± 0,5 h (30 minutos) a temperatura de 23ºC e durante seis dias a temperatura de 55 ± 4°C em estufa. A ruptura foi realizada com o corpo de prova a temperatura de 23ºC. De acordo com a NBR 5751 (ABNT, 1992), para que seja evidenciada a pozolanicidade do material é necessário alcançar resistência à compressão superior a 6 MPa.

3.2.3 Perda ao Fogo

Para esta parte do estudo, a amostra foi colocada para secar em estufa a 50ºC de acordo com procedimento do LAMIR (laboratório onde o ensaio foi realizado). Nesta seqüência, foi pesado aproximadamente 2 gramas de material, que depois foi levado para o forno mufla a 1000°C por 2 horas. Este procedimento consome toda a matéria orgânica presente na amostra, ou seja, a diferença entre a massa do material seco em estufa a 50°C e a massa submetida a 1000°C é a matéria orgânica existente na amostra de cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

3.2.4 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A análise química do material estudado foi realizada no LAMIR (Laboratório de Minerais e Rochas da UFPR), através de fluorescência de Raios-X. Inicialmente foram moldadas pastilhas do material em estudo para o acoplamento no equipamento (Figura 12) e obtenção da constituição química do material. Estas pastilhas podem ser feitas de duas maneiras: através de pérolas fundidas ou prensadas. Antes de se definir qual a forma de confecção das pastilhas foi feito o ensaio de perda ao fogo, para verificar a quantidade de matéria orgânica e/ou compostos de enxofre na amostra. Essa quantidade, quando maior que 40%, pode danificar os cadinhos de platina utilizados na obtenção das pérolas. Para as amostras com grande quantidade de matéria orgânica foi utilizada a prensa para obtenção das pastilhas.

Figura 12 - Equipamento para realização de FRX.
Fonte: Própria.

Os detalhes da confecção da pérola e da pastilha encontram-se apresentados a seguir:

Para confecção das pérolas foram utilizadas as seguintes quantidades de materiais:

- 9 g de material fundente (tetraborato de lítio);
- 0,9 g do material a ser ensaiado (cinza de bagaço de cana-de-açúcar);
- 4 espátulas de nitrato de amônia.

Os materiais foram homogeneizados, e em seguida foram depositados em uma cápsula de platina e colocados na fusora (Figura 13). A fusora é um equipamento que tem três chamas acionadas manualmente e que mantêm as amostras aquecidas à 1000ºC pelo tempo programado no equipamento. As amostras dentro dos cadinhos de platina entram em fusão e o material foi vertido automaticamente em fôrmas em forma de placa circular, como ilustrado na Figura 14.

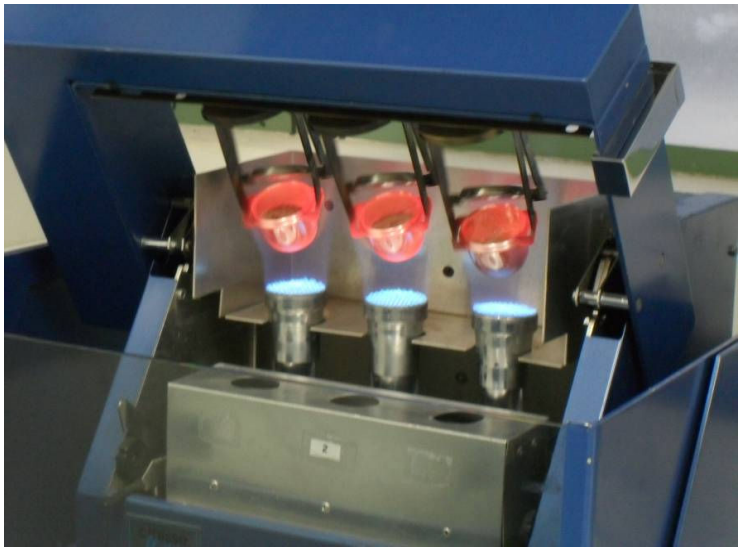


Figura 13 - Fusora em funcionamento.

Fonte: Própria.

Figura 14 - Pérola formada na fundição.

Fonte: Própria.

Após o término da confecção de cada pérola, foi efetuada uma verificação de ocorrência de possíveis falhas na fundição e, caso necessário, a moldagem da pérola era refeita

No caso das pastilhas prensadas, elas foram compostas por 8,4 g de material, divididos em:

- 1,4 g de cera para ajudar na prensagem;
- 7 g do material a ser ensaiado (cinza de bagaço de cana-de-açúcar).

A amostra era homogeneizada e prensada com pressão de 40 tf/cm². Os dados do equipamento de prensagem foram: tempo ascendente de 50 segundos, tempo constante de 60 segundos e tempo descendente de 30 segundos. A amostra oferece visualmente a aparência de uma pastilha (Figura 15). A superfície com melhor acabamento foi a face utilizada no ensaio de FRX.

Figura 15 - Amostra prensada.

Fonte: Própria.

3.2.5 Difração de Raios-X (DRX)

É um ensaio de caracterização mineralógica que analisa qualitativamente os minerais presentes na amostra. O resultado se apresenta em um gráfico que indica os picos característicos da estrutura cristalina de cada espécie química. O equipamento do ensaio (Figura 17) lança raios-X na amostra que, dependendo do tipo de cristal de cada mineral, devolve o raio a um determinado ângulo. Como cada mineral apresenta uma composição cristalográfica diferente, cada ângulo caracteriza um mineral presente na amostra.

A amostra deve ser colocada em molde de aço como pode ser visualizado na Figura 16.

Figura 16 - Amostras prontas para o ensaio DRX.

Fonte: Própria.

Figura 17 - Equipamento para realização de DRX

Fonte: Própria.

3.2.6 Granulometria a Laser

O ensaio consiste em analisar a amostra num equipamento composto por duas partes: um sistema de dispersão e um sistema focal. A amostra é dispersa em um fluido (neste caso foi usado água), um raio laser é emitido e sofre difração, que varia conforme o tamanho das partículas. Estes resultados são coletados

automaticamente dando, em poucos segundos, a distribuição granulométrica da amostra. O equipamento utilizado é do modelo CILAS 1064, apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Granulômetro a laser CILAS 1064.
Fonte: Própria.

3.2.7 Moagem das Amostras

Nesta parte do processo foi empregado um moinho de panelas, utilizado para a realização das moagens (quando para determinada amostra se fez necessário). Foi empregado um moinho da marca AMEF. Suas panelas (Figura 19), como são chamados os recipientes onde o material é colocado para a realização da moagem são de nitrito de titânio, material mais leve do que outros modelos, pesando o conjunto em torno de 7 quilos.

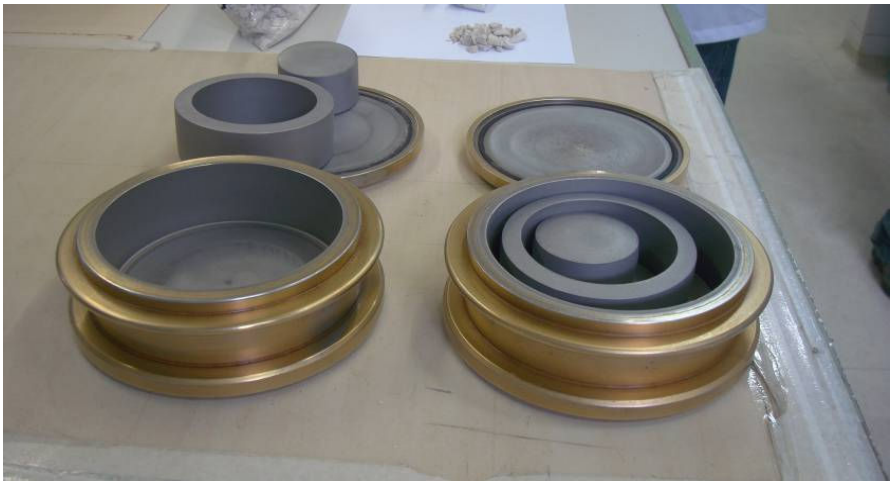


Figura 19 – Panelas.
Fonte: Própria.

O ciclo de funcionamento do aparelho vai de 0 a 90, sendo cada 10 equivalentes ao tempo de 6 segundos. Na moagem empregada neste estudo, que foi aplicada na amostra 600°C RR, empregou-se a numeração 50, equivalente a duração de 30 segundos na máquina.

A quantidade de material em cada ciclo de moagem é entre 30 e 32 gramas. Quantidades superiores dificultam a moagem, deixando “grumos” na amostra, ou seja, ela não fica totalmente pulverizada e quantidades inferiores podem danificar as panelas, devido ao impacto gerado durante o ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo traz os resultados dos ensaios realizados (massa específica, índice de atividade pozolânica com cal, FRX e perda ao fogo, DRX e granulometria a laser) e aborda algumas discussões possíveis de acordo com os resultados obtidos.

4.1 Massa Específica

A Tabela 5 - Massa específica dos materiais em estudo. apresenta os valores de massa específica dos materiais utilizados.

Tabela 5 - Massa específica dos materiais em estudo.

Amostras	Massa Específica (g/cm³)
Cinza *in natura* (queima prévia)	1,67
Cinza Calcinada 600ºC RL	2,56
Cinza Calcinada 600ºC RR	2,60
Cinza Calcinada 700ºC RL	2,54
Cinza Calcinada 700ºC RR	2,51
Metacaulim	2,43
Sílica Ativa	2,08
Cal	2,21

Fonte: Própria.

O ensaio de massa específica foi necessário para a realização do índice de atividade pozolânica com cal, onde para a determinação da quantidade de material pozolânico a ser utilizado na argamassa confeccionada é preciso entrar na fórmula tanto com a massa específica da cal como da amostra em análise.

4.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cal (IAP com Cal)

As Tabelas 6 e 7 mostram os resultados do ensaio de atividade pozolânica com cal realizado de acordo com a NBR 5751/92. A variável de resposta deste ensaio é a resistência à compressão realizada na argamassa de cal, adição a ser testada, areia normal e água.

Tabela 6 - Quantitativo de materiais para IAP com cal.

Amostras	Variação	água/ aglomerante	Água (g)	Cal (g)	Adição (g)	Espalhamento (mm)
In natura		1,53	439,5	114,4	172,9	235,0
600ºC	RL	0,87	300,7	104,0	240,9	240,0
	RR	0,90	314,7	104,0	244,7	226,7
	RR + Moagem 30 s	0,64	242,3	112,0	263,7	225,6
700°C	RL	0,82	280,2	104,0	239,0	226,0
	RR	0,77	263,1	104,0	236,2	221,0
Metacaulim		0,96	319,7	104,0	228,7	223,0
Sílica Ativa		0,95	283,6	104,0	195,8	221,6

Fonte: Própria.

Tabela 7 - Resultado da resistência à compressão.

Amostras	Resultados Individuais			Média (MPa)	Repetibilidade (%)	Coeficiente de variação (%)	Desvio Padrão (MPa)
	CP 1	CP 2	CP 3				
In natura	0,30	0,30	0,30	0,30	0,0	0,0	0,0
600ºC RL	1,0	1,0	*	1,0	0,0	0,0	0,0
600°C RR	2,8	2,8	2,8	2,8	0,0	0,0	0,0
600°C RR + 30 s	4,2	4,2	4,3	4,2	2,40	0,07	0,058
700°C RL	4,5	4,4	4,6	4,5	2,20	0,22	0,1
700°C RR	5,2	5,3	5,2	5,2	1,90	0,07	0,058
Metacaulim	14,8	16,0	16,0	15,6	5,10	9,2	0,69
Sílica Ativa	12,9	11,9	10,4	11,7	11,10**	13,5	1,26

Fonte: Própria.

* Corpo de prova descartado devido à ruptura ocasionada durante o capeamento.

** Repetibilidade necessária, parâmetro acima do estipulado pela NBR 7215 (ABNT, 1996) onde o limite máximo é de 10% da média entre eles.

É importante salientar que, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996), a repetibilidade da amostra com sílica ativa deveria ser refeita por ultrapassar os limites, sendo que a diferença entre dois resultados finais referentes à mesma idade (neste caso, 7 dias) obtidos pelo mesmo operador e mesma amostra, com o mesmo equipamento, não deve ultrapassar 10% da média entre eles.

Como se pode verificar, as resistências à compressão obtidas não alcançaram o valor de 6 (seis) MPa em nenhum dos casos estudados até o momento para as amostras de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Isso indica que o material não tem propriedades pozolânicas de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 1992) – IAP com cal – para as condições de calcinação, resfriamento e moagem até então estudadas.

A Figura 20 mostra a resistência à compressão para as séries estudadas até o momento. Neste gráfico é importante verificar que a cinza *in natura* praticamente não tem atividade pozolânica e a calcinação a 600°C com o resfriamento lento resultou em um material aproximadamente 3 (três) vezes mais reativo do que a cinza *in natura*. Além disso, a Figura 20 também deixa evidente que o resfriamento lento (com duração de 15 horas aproximadamente) tende a favorecer a cristalização do material, resultando em uma adição pouco reativa. Estes resultados indicam que o resfriamento rápido resultou em um grau de amorficidade maior da amostra refletindo em uma elevação da resistência. Este é um resultado esperado, uma vez que o resfriamento rápido tende a dificultar organização da estrutura cristalina do material após a calcinação (SILVEIRA, 2007). Outro detalhe importante do resultado ilustrado é o fato de que a moagem elevou em 50% a atividade pozolânica da cinza submetida ao resfriamento rápido.

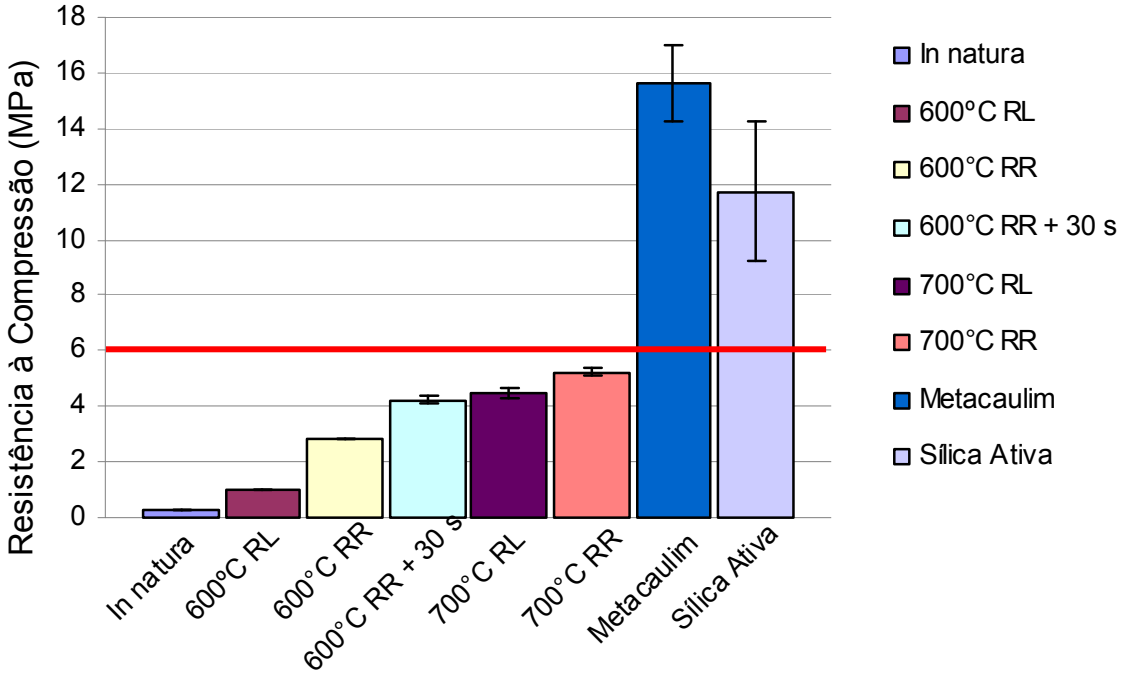


Figura 20 - Resistência à compressão IAP com cal.

Fonte: Própria.

4.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Foram encontradas nas cinzas analisadas as porcentagens de compostos químicos representados na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição Química das Amostras.

Composição Química (%)														
Amostras		SiO_2	K_2O	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	TiO_2	SO_3	MgO	Cl	ZnO	MnO	Na_2O	BaO
In natura		11,3	8,8	5,3	2,9	1,8	1,5	0,7	0,6	0,3	-	0,2	0,1	-	-
Metacaulim		53,6	0,5	2,6	-	37,5	-	1,6	0	0,1	-	-	-	-	-
Sílica Ativa		96,4	0,94	0,06	0,3	0,02	0,11	0,007	-	0,73	-	-	0,029	0,17	-
600°C	RL	69,9	8,06	3,82	2,4	6,18	1,88	1	-	3,36	-	-	0,08	0,36	-
	RR	65,1	10,1	4,1	2,9	6,2	2,6	0,9	-	3	1	-	0,1	0,1	0,1
700°C	RL	73,4	7,18	3,78	2,1	5,84	1,67	1,03	-	3,07	-	-	0,07	0,47	-
	RR	75,7	4,6	2,4	2,7	5,9	2,6	0,5	0,7	2,9	<0,1	<0,1	0,1	0,3	-

Fonte: Própria.

Os valores de perda ao fogo para cada caso estudado estão representados a seguir:

- In natura: 66,1%;
- Calcinada 600°C – RL: 2,57%;
- Calcinada 600°C – RR: 2,9%;
- Calcinada 700°C – RL: 0,94%;
- Calcinada 700°C – RR: 1,29%;
- Metacaulim: 3,9%
- Sílica Ativa: 1,81 %

A alta perda ao fogo apresentada pela amostra *in natura* indica o alto teor de matéria orgânica que esta amostra ainda apresenta, provavelmente devido ao fato de a queima preliminar não ser suficiente para a transformação do material em adição no estado predominantemente inorgânico.

As exigências de composição química estabelecidas pela NBR 12653 (ABNT, 1992) para os materiais pozolânicos e os respectivos valores encontrados pela análise química dos materiais estudados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Exigências químicas de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992) e resultados da análise química.

Propriedades	Classes de Material Pozolânico NBR 12653			Amostras						
	N	C	E	*In natura*	600°C RL	600°C RR	700°C RL	700°C RR	Metacaulim	Sílica Ativa
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ % mín.	70	70	50	18,4	79,9	75,4	83	84	93,7	96,46
SO_3 % máx.	4	5,0	5,0	0,3	0	0	0	0,7	0	0
Perda ao fogo, % máx.	10	6,0	6,0	66,1	2,57	2,9	1,39	1,29	3,9	1,81
Álcalis disponíveis em Na_2O, % máx.	1,5	1,5	1,5	-	0,36	0,1	0,47	0,3	0	0,17

Onde:

Classe N: pozolanas naturais e artificiais (argilas calcinadas);

Classe C: cinzas volantes e materiais resultantes da queima do carvão;

Classe E: os que não enquadram nas classes N ou C.

Fonte: Própria.

Comparando-se os valores da análise química com os valores limites definidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992), é possível concluir que os materiais calcinados a 600°C e 700°C se encaixam nas solicitações da norma. As cinzas calcinadas estudadas, portanto, se enquadram como material pozolânico de acordo com sua composição química, porém ela ainda não é reativa de acordo com os estudos de IAP com cal.

4.4 Difração de Raios-X (DRX)

Os difratogramas das amostras de cinza produzidas nesta pesquisa estão apresentados nas Figuras 21 a 24, além de duas amostras, uma de metacaulim e outra de sílica ativa, pozolanas comercialmente conhecidas para servir de comparação.

As Figuras 21 e 22 indicam que a velocidade de resfriamento não causou diferenças nos difratogramas dos materiais, indicando que tanto o resultado para resfriamento lento como para resfriamento rápido resultam em materiais com mesmo grau de cristalinidade. Estas constatações não estão exatamente de acordo com o resultado físico indicado pelo procedimento da NBR 5752/92 (IAP com cal), que apesar de não classificar o material como pozolânico indica que o resfriamento teve reflexo na reatividade do material.

Os difratogramas das amostras de cinza de bagaço de cana-de-açúcar apresentam picos de quartzo cristalino, já nas amostras do metacaulim e da sílica ativa é possível visualizar halos amorfos, característicos de materiais pozolânicos. Os únicos picos presentes nestes materiais são os do porta amostras de alumínio utilizado para o confinamento da amostra. Na amostra de sílica ativa há uma tendência de formação cristalina, que possivelmente seja cristobalita (um polimorfismo da sílica amorfa), implicando que para a produção desta pozolana fez-se uso de altas temperaturas.

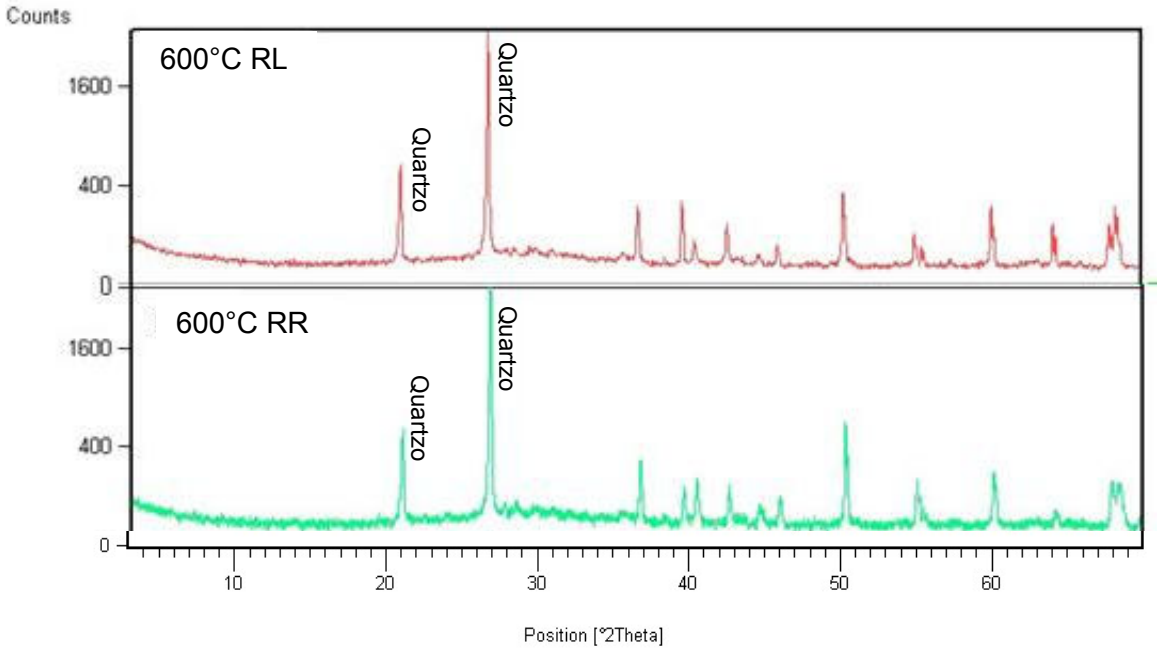


Figura 21 - Difratograma das amostras de 600°C RL e RR.

Fonte: Própria.

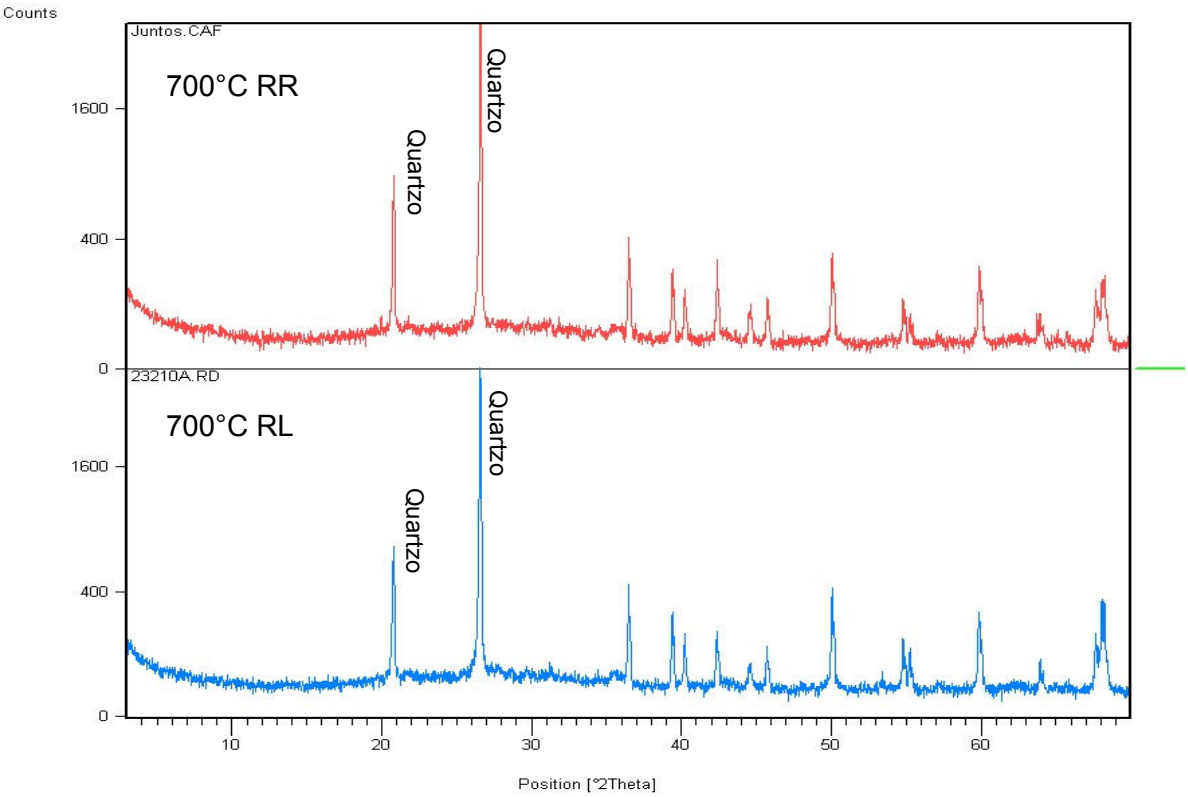


Figura 22 - Difratograma das amostras de 700°C RL e RR.

Fonte: Própria.

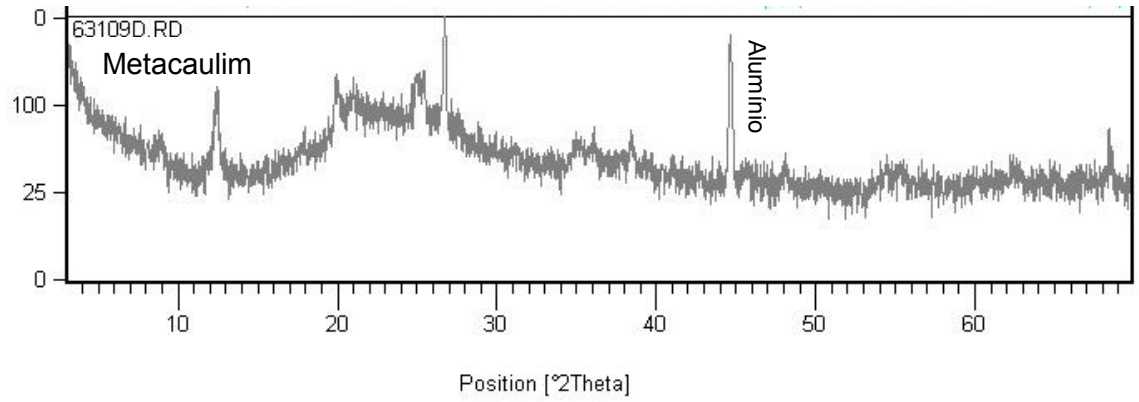


Figura 23 - Difratograma da amostra de metacaulim.

Fonte: Própria.

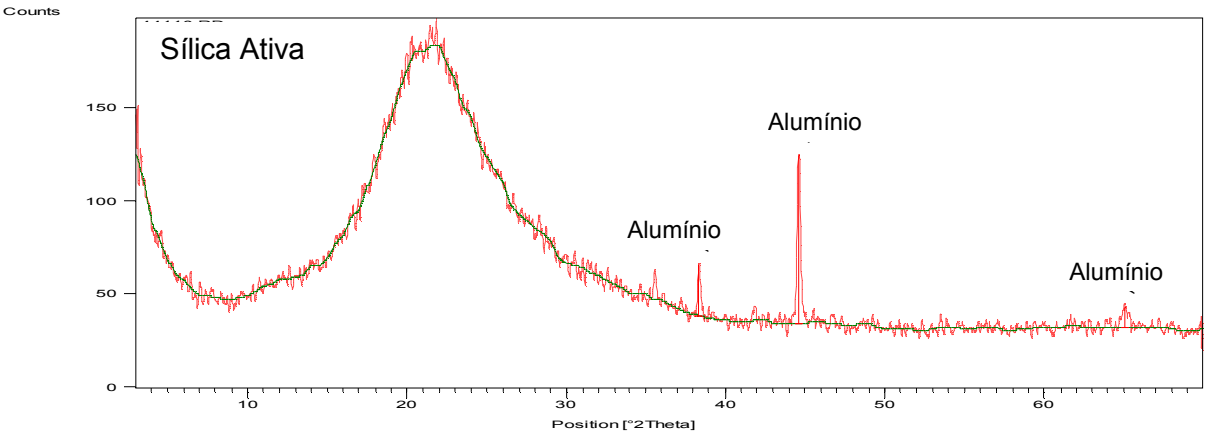


Figura 24 - Difratograma da amostra de sílica ativa.

Fonte: Própria.

4.5 Granulometria a Laser

A Figura 25 mostra a distribuição granulométrica das cinzas calcinadas deste estudo e as curvas relativas as amostra de metacaulim e sílica ativa para servir de comparação quanto ao nível de finura. Desse modo, constata-se que as cinzas empregadas neste estudo, apenas com a calcinação (sem moagem), têm grau de finura inferior ao metacaulim e a sílica, o que deve interferir na sua reatividade devido à menor área disponível para reação. Este fato levou a idéia de moer a cinza de bagaço de cana-de-açúcar para obter um material com a finura

semelhante a dos materiais pozolânicos consagrados pelo mercado como materiais de alta eficiência.

Partindo por este caminho, as amostras foram submetidas à moagem resultando em cinzas até mais finas do que o metacaulim e sílica ativa. Deve-se notar na Figura 25, que estão plotados resultados do ensaio de granulometria para outras amostras (600°C RR + 60s e 700°C RR + 60s). Tratam-se de outros níveis de moagem que estão sendo adotados e que ainda não se tem os resultados de atividade pozolânica com a cal. O motivo é que o estudo ainda está em andamento e os resultados de atividade pozolânica serão futuramente estendidos para estas amostras com alto grau de finura, semelhante ao metacaulim e sílica ativa. O grau de finura parece ter tido grande efeito na reatividade do material da amostra 600°C RR + 30s (ver Figura 25) e este foi o motivo de adotarmos o caminho de produzir amostras mais finas, ou seja, adotando a moagem por 60 segundos.

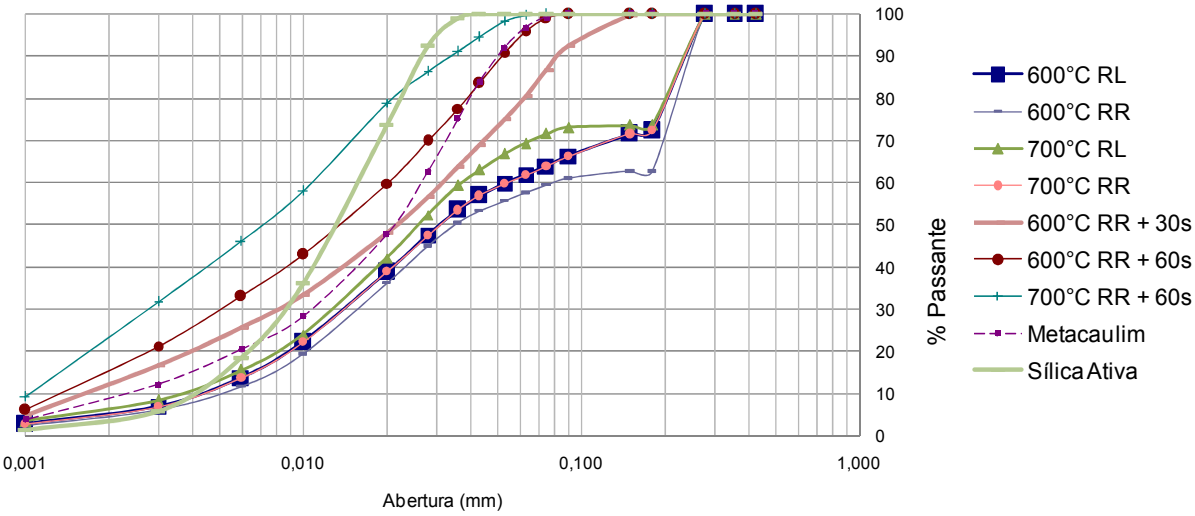


Figura 25 - Curva granulométrica das amostras.

Fonte: Própria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresenta as considerações finais deste trabalho divididas em duas partes, sendo o primeiro componente, as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento da pesquisa, com os resultados proporcionados pelos ensaios feitos, e a segunda parte como sugestão para trabalhos futuros, incluindo os

itens de continuidade desta pesquisa. E também as produções científicas geradas através deste trabalho.

5.1 Conclusões

Sobre o trabalho realizado conclui-se que os materiais pesquisados, obtidos com as calcinações de 600°C e 700°C por 5 (cinco) horas e resfriado ao longo de 15 horas ou mesmo com choque térmico, não apresentam atividade pozolânica de acordo com o critério atual de classificação de materiais pozolânicos estabelecido pela ABNT. Para esta forma de obtenção de cinza, sua utilização deve ser estudada como fíler para o concreto, podendo reduzir o número de vazios e possivelmente aumentar a resistência do concreto.

Porém, algumas discussões foram realizadas sobre a não-pozolanicidade do material estudado, que engloba tanto os métodos para obtenção do material (cinza) quanto à execução dos ensaios. Primeiramente, a escolha da temperatura e tempo de calcinação foi baseada em estudos de Freitas (2005), de 600°C e 700°C – 5 (cinco) horas, pois foram com estas temperaturas que foram obtidas as amostras com maior atividade pozolânica. Porém, é necessário relatar que, Tashima *et al.* (2004), mencionam que a temperatura, o tempo de queima e o tempo de moagem são fatores importantes para a pozolanicidade, no caso aqui estudado. Nos estudos com um material semelhante, a cinza de casca-de-arroz, recomenda-se a moagem em moinho de bolas de aproximadamente 30 minutos (TASHIMA *et al*., 2004). Outro fator que pode ter influenciado nos resultados de atividade pozolânica das amostras são as grandes quantidades de água adicionadas às dosagens das argamassas utilizadas para a determinação de IAP com cal. Segundo Gava *et al.* (1999), a utilização de um único teor de substituição de pozolana e a possibilidade de variação na relação água/aglomerante no ensaio de pozolanicidade atrapalham a classificação das pozolanas. Portanto, deve-se eliminar esta variável fixando-se uma relação água/aglomerante e variando os teores de substituição.

Aliando o tempo, temperatura de queima e resfriamento, escolhidos de acordo com os trabalhos de outros autores, com o resultado da composição química das amostras, é possível notar que a amostra se enquadra nos parâmetros dispostos pela NBR12653 (ABNT, 1992) para classificação dos materiais

pozolânicos. Portanto, as exigências químicas são atendidas pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar, porém a amostra ainda não é reativa o suficiente.

Apesar de o produto final obtido nesta pesquisa ainda não ser enquadrado como uma pozolana de acordo com a ABNT, algumas conclusões importantes sobre a reatividade do material devem ser estabelecidas, tais como:

- O uso de resfriamento mais brusco elevou de forma relevante a reatividade do material com cal;
- A calcinação do material elevou a sua reatividade se comparamos com a cinza *in natura*;
- O grau de moagem elevou consideravelmente a reatividade da cinza com a cal;
- A temperatura de calcinação de 700°C resultou em uma cinza muito mais reativa do que a cinza produzida a 600°C (aumento de mais de 85%).

O material pesquisado tem grandes chances de apresentar atividade pozôlanica e poder ser utilizado em dosagens de concreto como pozolana, inserindo as usinas cimentícias e sucroalcooleiras em um processo sustentável, contribuindo para a inovação tecnológica na área do concreto, que busca dia após dia aumentar a vida útil e a qualidade das estruturas, porém sem trazer prejuízos à sociedade, minimizando os impactos ambientais causados pela construção civil ao meio ambiente.

5.2 Produção Científica

Este trabalho gerou a publicação de alguns trabalhos científicos, como mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Produção Bibliográfica relacionadas com a pesquisa.

n.	Título do Artigo	Local da Publicação	Estado Atual
1	Investigação sobre a atividade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar	17º evento de iniciação científica da UFPR (2009)	Publicado e apresentado no evento
2	Cinza de bagaço de cana-de-açúcar: contribuição para a sustentabilidade dos materiais de reparo	VI congresso internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas (2010) – Córdoba – Argentina	Publicado e apresentado no evento
3	Cinza de bagaço de cana-de-açúcar como adição para concreto: investigação dobre a atividade pozolânica	I CICPG – Congresso de Iniciação Científica e Pós-graduação (2010) - Florianópolis	Publicado e apresentado no evento
4	Influência da temperatura de calcinação e tipo de resfriamento na atividade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar	52° congresso Brasileiro do concreto (2010) - Fortaleza	Publicado e apresentado no evento
5	Cinza de bagaço de cana-de-açúcar como adição para concreto: investigação sobre a atividade pozolânica	18º evento de iniciação científica da UFPR (2010)	Publicado e apresentado no evento

Fonte: Própria.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

A experiência com este estudo abriu um horizonte de pesquisa de modo que pode-se citar algumas sugestões para trabalhos futuros. Estas sugestões estão citadas a seguir e algumas delas serão partes da continuidade deste trabalho.

- Estudo da temperatura ótima de calcinação do bagaço de cana-de-açúcar para atingir a maior reatividade;
- Estudo do tempo ótimo de permanência no processo de calcinação para a maior atividade pozolânica;
- Estudar a reatividade da cinza de bagaço de cana-de-açúcar pelo método Chapelle;

- Estudo da morfologia dos grãos de cinza e sua influência na fluidez de argamassas e concretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1ª Edição. PINI. São Paulo, 2000.

ARANDA, D. PróAlcool - **Programa Brasileiro de Álcool. Portal do Biodiesel.** Disponível em: http://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool.htm. (Acesso em 12/2009).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

_____ **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____ **NBR 7214**: Areia Normal para ensaio de Cimento. Rio de Janeiro, 1982.

_____ **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão – Anexo B: Determinação do Índice de Consistência Normal. Rio de Janeiro, 1996.

_____ **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

_____ **NBR 13956**: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

_____ **NBR NM 23** - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. NBR NM 23. Rio de Janeiro, 2001.

BRASIL ENGENHARIA, Revista. **Votorantim Cimentos promove Fórum CSI no Brasil** 02/09/2009 ENGENHO EDITORA TÉCNICA LTDA. Disponível em: www.brasilengenharia.com.br. (Acesso em: 11/2010)

CAMARGO, A. T.; DA SILVA NETO, H. F.; TASSO JÚNIOR, L. C.; MARQUES, M. O. **Potencial de produção de bagaço por cultivares de cana-de-açúcar**. Unesp - Universidade Estadual Paulista - PROPe - Pró-Reitoria de Pesquisa, 2007. Disponível em: <http://prope.unesp.br/xxi_cic/27_39081287818.pdf>. (Acesso em: 03/2010).

CARMO, J. B. M. do. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face à resistência mecânica e à viabilidade econômica.** Dissertação. Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2006.

CARVALHO, M. B. M. de. **Impactos e conflitos da produção de cimento no Distrito Federal.** Dissertação. Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2008.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIN, E. de M. R. **Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios.** Química Nova, Vol. 32, Nº 1, 82-86, 2009.

FAPESP. Agência de Notícias da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, **Seleção de reportagens sobre cana, derivados de cana e etanol publicadas na revista Pesquisa FAPESP**, 2007. Disponível em: www.fapesp.br. (Acesso em: 12/2009).

FONSECA, G. C. da. **Adições minerais e disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica.** Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2010.

FREITAS, E. de S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do Município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. Dissertação. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro, 2005.

GAVA, G. P.; PRUDÊNCIO JR., L. R.; CASALI, J. M. **Comparação entre diferentes metodologias utilizadas no Brasil para avaliação da pozolanicidade da cinza volante e da cinza de casca de arroz**. 5° Congresso Brasileiro do Cimento, 1999.

GOBBI, A.; GROENWOLD, J.A.; MEDEIROS, M.H.F.de. **Cinza de bagaço de cana-de-açúcar: Contribuição para a sustentabilidade dos materiais de reparo**. VI Congresso Internacional sobre Patologias e Reabilitação de Estruturas. Córdoba. Anais do VI CINPAR, 2010, 2010.

GROENWOLD, J. A. **Investigação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. Relatório de Pesquisa de Iniciação Científica. Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2010.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas temáticos. Cana.** Disponível em:

ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/mapas_murais/cana_2005.pdf. (Acesso em: 12/2009).

ISAIA, G.C.*et al.* **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais.** Capítulo 12 – Microestrutura dos polímeros. Vol 1. 2ª Edição atualizada e ampliada. IBRACON. São Paulo, 2010.

LANDELL, M. ProCana – **O programa cana-de-açúcar do Instituto Agronômico**. Revista O Agronômico, n° 55. São Paulo, 2003.

LIMA, A. R. de L. **Avaliação das conseqüências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas.** Tese. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

LUNA, R. G. de, COUTINHO, H. D. M. Revista Caatinga. **Efeitos de bagaço de cana-de-açúcar e minhocas (pontoscolex corethrurus) sobre a microbiota do solo**. UFERSA – Universidade Federal Rural de Seminário, V.21, N.1, P.156-161, Janeiro/Março de 2008. Mossoró - RN. Disponível em: www.ufersa.edu.br/caatinga. (Acesso em: 11/2010).

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. **Advances in Concrete Technology.** Vol 1, CANEMET. Canadá, 1996.

MEDEIROS, M.; HELENE, P. **Relatório Técnico do MetacaulimHP como adição de Alta Eficiência em Concretos de Cimento Portland**. Relatório Técnico, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

MEDEIROS, M.H.F.de. Projeto de Pesquisa: **Cinza de bagaço de cana-de-açúcar como adição para concreto: efeito pozolânico ou efeito fíler?** Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª Edição em Inglês. 1ª Edição em Português. Editora IBRACON. São Paulo, 2008.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçado com fibras de celulose e PVA.** Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PAULA, M. O. de. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Dissertação. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2006.

PróAlcool - **Programa Brasileiro de Álcool.** Portal do Biodiesel, 2007. Disponível em: http://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool.htm. (Acesso em 12/2009).

RILEM TECHNICAL REPORTS. Final Report: **Siliceous by-products for use in concrete**. **Materials and Structures.** V. 21, n. 121. 1988.

ROMERO, T. **Bagaço na construção civil.** Agência de Notícias da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2007. Disponível em: http://www.agencia.fapesp.br/materia/7211/noticias/bagaco-na-construcao-civil.htm. (Acesso em 04/2009).

SALES, A., LIMA, S. A., SANTOS, T. J. dos, CORDEIRO, S.G.F., CERRALIO, B.S.. **Argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao cimento Portland: influência do tipo de queima do bagaço.** Trabalho CB0145. 52° Congresso Brasileiro do Concreto. 2010.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado.** Tese. Universidade Federal do Rio Grande do sul. Rio Grande do Sul, 2007.

TASHIMA *et al*. **Avaliação do teor de cinza de casca de arroz no concreto**. IBRACON Volume 2 - Construções em concreto - Trabalho CBC0175. 46º Congresso Brasileiro do Concreto. 2004.

UNICA - União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo. **Setor Sucroenergético – Histórico e Mapa da Produção** (2006 e 2009) Disponível em:<http://www.unica.com.br>. (Acesso em 06/2009).

APÊNDICE 1

Manual de Instruções – Forno Mufla Q318S24

- **Instruções importantes:**

  - Faixa de trabalho entre 300 e 1200ºC;

  - Duplo display: o de cor verde apresenta o valor da programação e o de cor vermelha indica a temperatura do equipamento;

  - Alguns ruídos são normais durante o seu funcionamento (estalos);

  - Não bater a porta, evitando que o equipamento seja danificado;

  - Quando não estiver fazendo uso da mesma, desligar a chave geral.

- **Operação:**

  - **Programando para Temperaturas Diretas (sem patamares):**

  -- Utilize as teclas "♦" (subindo ou descendo) para chegar até a temperatura desejada. Esta opção necessitará de um operador para eventuais intervenções.

  - **Programando Rampas e Patamares:**

  -- Segure "●", utilizando das teclas "♦" chegue a PG XX (XX = número da programação atual), para escolher outro número, pressione "◄►" e com as teclas "♦" altere para a numeração desejada, pressionando novamente "◄►" para confirmar a alteração;

  -- Na programação escolhida (por exemplo, PG 7), utilize as teclas "♦" até chegar em nSG (número de segmentos desejado de rampas e patamares), fazendo uso de "◄►" para permitir as modificações, altere para a quantidade de segmentos desejado através das teclas "♦", confirmando a alteração com a tecla "◄►" (por exemplo 4 segmentos);

  -- Pressione "♦" até SP 0 (temperatura inicial da programação, por exemplo, 20ºC), para arbitrar o valor pressione "◄►", com as teclas "♦" altere para a temperatura desejada, e confirme a alteração, novamente com a tecla "◄►";

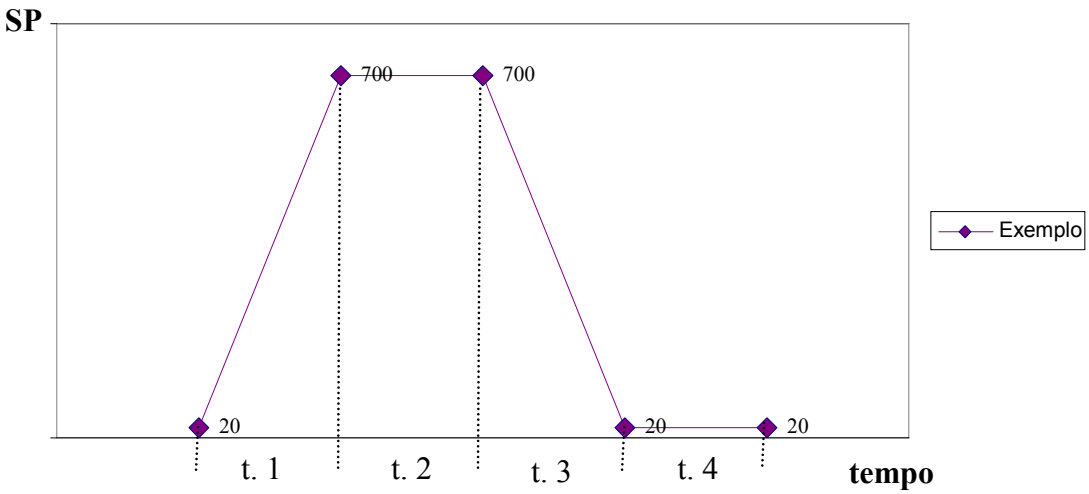
  -- Pressione "♦" até t. 1 (tempo de duração da primeira rampa ou patamar, por exemplo, 01h00min), para arbitrar o valor, pressione "◄►", com as teclas "♦" altere para o tempo desejado, e confirme a alteração, novamente com a tecla "◄►";

-- Pressione “♦” até SP 1 (temperatura do segundo ponto da rampa ou patamar, por exemplo, 700ºC), para arbitrar o valor, pressione “◄►”, com as teclas “♦” altere para a temperatura desejada, e confirme a alteração, novamente com a tecla “◄►”;

-- Pressione “♦” até t. 2 (tempo de duração da segunda rampa ou patamar, por exemplo, 05h00min), para arbitrar o valor, pressione “◄►”, com as teclas “♦” altere para o tempo desejado, e confirme a alteração, novamente com a tecla “◄►”;

-- E assim sucessivamente até a última temperatura, (por exemplo, SP 4, para os 4 segmentos escolhidos anteriormente). Para salvar a programação pressione as teclas “♦” até END, segure “◄►” para salvar e “●” para encerrar;

-- O gráfico abaixo representa como deverá se comportar a programação acima citada nos exemplos.



- **Excluindo uma programação já existente:**

-- Mantenha pressionado “●”, com as teclas “♦”chegue a PG XX (XX = número da programação atual), para escolher outro número, pressione “◄►” e com as teclas “♦” altere para a numeração desejada, pressionando novamente “◄►” para confirmar a alteração;

-- Com as teclas “♦” chegue a PGFn, pressione “◄►” e com as teclas “♦” altere entre Edit e Del (deixe em Del), pressione novamente “◄►” para confirmar, a programação escolhida será deletada.

- **Ativando uma programação:**

-- Pressione levemente “●”, com as teclas “♦”chegue a PG XX (XX = número da programação atual), para escolher outro número, pressione “◄►” e com as teclas “♦” altere para a numeração desejada, pressionando novamente “◄►” para confirmar a alteração;

-- com as teclas “♦”chegue a StAt, pressione “◄►” e com as teclas “♦” altere entre off e run (deixe em run), pressione novamente “◄►” para confirmar, a programação escolhida será iniciada.

- **Desligando uma programação:**

-- Pressione levemente “●”, com as teclas “♦”chegue a StAt, pressione “◄►” e com as teclas “♦” altere para off ao invés de run, pressione novamente “◄►” para confirmar, a programação escolhida será finalizada.